

77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング用フレネルレンズの設計

滝本 未来[†] 中田 淳^{††} 佐藤 弘康^{†a)} 澤谷 邦男[†]

Design of Fresnel Lens Used for 77 GHz Passive Millimeter-Wave Imaging

Miki TAKIMOTO[†], Jun NAKADA^{††}, Hiroyasu SATO^{†a)}, and Kunio SAWAYA[†]

あらまし フレネルレンズは軽量化、薄型化可能なレンズとして期待されている。フレネルレンズを微弱な熱雑音を検出するミリ波パッシブイメージングに用いるためにはゾーニングによる集光特性の劣化を詳細に評価する必要がある。本論文では、二次元 FDTD 解析を用いて口径 100 mm のミリ波帯フレネルレンズの集光位置、集光位置における電界強度分布等の基本特性を定量的に求め、非球面レンズとの性能の比較を行っている。特に、レンズのベース厚に対する基本特性の変化を詳細に検討し、機械的強度とともに高い集光特性を有するフレネルレンズの構造パラメータを求めている。設計した構造を試作して測定を行った結果、同一口径の非球面レンズに比べ、集光位置における 76.5 GHz の電界振幅の低下が約 1.5 dB 程度であることが明らかとなった。また、実験により得られた集光位置と集光位置における電界振幅の特性は FDTD 解析で得られた特性と同様の傾向を示しており、レンズ設計において二次元 FDTD 解析が有用であることを示している。

キーワード フレネルゾーン、フレネルレンズ、パッシブイメージング、レンズアンテナ

1. ま え が き

ミリ波パッシブイメージングは、物体が放射するミリ波帯の熱雑音を受信し、人が所持する衣服下の不審物を非接触・非侵襲で検知可能な技術として実用化が期待されている [1]。受信信号が極めて微弱な熱雑音であることから、高感度なイメージング素子、高効率で高分解能のレンズが要求される。

筆者らはこれまで、空港等の水際において使用するための 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し、評価を進めている [2], [3]。開発した装置のレンズは口径が 50 cm の非球面ポリエチレンレンズであり、空間分解能 20 mm 程度が実現できたものの、レンズの重量が 30 kg 程度と重く、装置全体の重量を左右するため大幅な軽量化が望まれる。また、77 GHz 帯の使用周波数を変えずに更に空間分解能を上げるためには、レンズ口径を更に増加させる必要がある。

軽量化、薄型化が可能なレンズとしてフレネルレン

ズがあり、これまでミリ波帯における様々な研究が行われてきた [4]~[8]。フレネルレンズは凸レンズを径方向にゾーニングされたものが一般的であるが、作製における工程を減らすため、各フルウェーブゾーンをサブゾーンに分割したものや [4], [6], [7], 一つのフルウェーブゾーンを 2 分割しただけのフレネルゾーンプレート (Fresnel Zone Plate, FZP), 周期的に誘電率を変化させたリング状誘電体レンズの研究が行われており [6], [8], レンズ口径, F 値, フルウェーブゾーン数, サブゾーン数等をパラメータとした性能の評価が行われている。

一般に、分割されたフルウェーブゾーンを同一平面上に固定するためには一様な厚さをもつ誘電体ベースが必要となり、機械的強度を保つためにレンズ口径が増加するほどベース厚を増加させる必要がある。ベース厚に対する集光特性については、文献 [4] では、ベース厚を変化して焦点における電界を解析により求め、実効波長程度の周期で約 2 dB の変化があることが報告されている。文献 [7] では、ベース厚が実効波長の 2.3 倍の周期でレンズアンテナの利得が約 4 dB 変化することが報告されている。しかしながら、サブゾーン数とベース厚の双方を変化した場合の特性については検討されておらず、集光位置の変化や集光位置にお

[†] 東北大学大学院工学研究科, 仙台市

Department of Electrical and Communication Engineering,
Tohoku University, Sendai-shi, 980-8579 Japan

^{††} 中央電子株式会社, 八王子市

Chuo Electronics Co. Ltd., Hachioji-shi, 192-8532 Japan

a) E-mail: sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

る電界強度，開口分布が回折パターンに及ぼす影響については十分に検討されていない。

そこで本論文では，二次元 FDTD 法を用いてミリ波帯フレネルレンズのサブゾーン数，ベース厚などの構造パラメータを変化させたときの集光位置，集光位置における電界振幅，焦点深度等の基本特性を求め，非球面レンズと性能を比較した結果を述べる．更に，機械的強度と高い集光特性を有する構造のフレネルレンズを試作し，測定結果と比較した結果を述べる．

2. 構造

図 1 に示すように，送信点 T と受信点 R を光軸上にとったとき，TOR を通る直進波と TQR を通る波の光路差が $m\lambda_0/2$ ($m = 1, 2, \dots$) 以下となる領域は，一般にフレネルゾーンと呼ばれる [9]．このとき，点 Q における第 m フレネルゾーンの半径を r_m とすると，

$$\sqrt{a^2 + r_m^2} + \sqrt{b^2 + r_m^2} - (a + b) = \frac{m\lambda_0}{2} \quad (1)$$

が成り立つ．ここで， λ_0 は自由空間波長である．式 (1) において， $a \rightarrow \infty$ ， $b = F$ とすると，

$$\sqrt{F^2 + r_m^2} - F = \frac{m\lambda_0}{2} \quad (2)$$

が成り立ち，

$$r_m = \sqrt{\left(\frac{m\lambda_0}{2}\right)^2 + mF\lambda_0}, m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

が得られる．ここで，図 1 に示すように次数 m が偶数または奇数のゾーンにリング状の導体または吸収体を設けて反射または遮へいたレンズはフレネルゾーンプレート (Fresnel Zone Plate, FZP) と呼ばれている．また，導体や吸収体の位置に位相を π 遅らせる誘電体位相板を設けたレンズは位相型 FZP と呼ばれている．

フレネルレンズの基本構造を図 2 に示す．上述の位相型 FZP では，フレネルゾーンの半径 r_m はゾーン間の最小光路差を $\lambda_0/2$ としている．ゾーン間の最小光路差を λ_0/P とした場合の各ゾーンの半径 r_n は

$$r_n = \sqrt{\left(\frac{n\lambda_0}{P}\right)^2 + \frac{2nF\lambda_0}{P}}, n = 1, 2, \dots, NP(4)$$

で与えられる．ここで， P は位相差 2π 当りの位相補正ゾーンの数， N は位相が 2π 変化するゾーンの数であり，それぞれサブゾーン数，フルウェーブゾーン数と呼ぶ． P はレンズ口径 D や焦点距離 F に無関係で

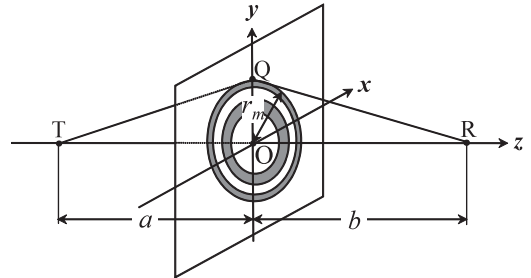


図 1 フレネルゾーン
Fig. 1 Fresnel zone.

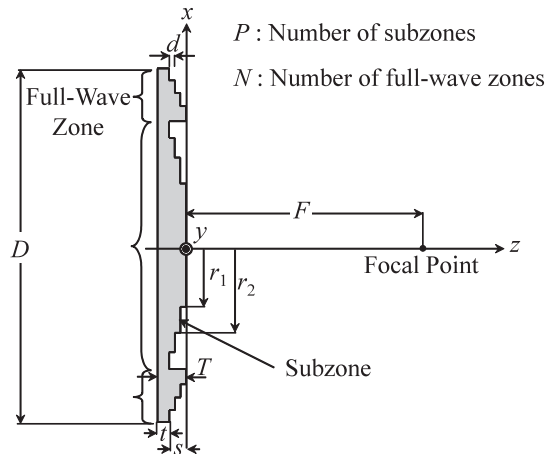


図 2 $N = 2$ ， $P = 4$ の場合のフレネルレンズの断面図
Fig. 2 Cross section of Fresnel lens in the case of $N = 2$ and $P = 4$.

表 1 基準としたフレネルレンズの構造パラメータ
Table 1 Standard parameters of Fresnel lens.

Parameter	[mm]	Number of cells
Diameter of lens	$D = 100$	$1000\Delta x$
Focal length	$F = 152.2$	$1522\Delta z$
Number of full-wave zones	$N = 2$	-

$$\epsilon_r = 2.34, \lambda_0 = 4 \text{ mm}, \Delta x = \Delta z = 0.1 \text{ mm}$$

あるが， N はこれらの値に依存しており， F/D が大きくなると N も増加する．また， $N = M/2$ の関係があり，図 2 に示したフレネルレンズは $N = 2$ ， $P = 4$ の場合を示している．なお，上述の位相型 FZP は $P = 2$ の場合に対応する．また，連続的なレンズ曲面を複数設けたフレネルレンズは $P = \infty$ の場合に相当する．

基準とした構造パラメータを表 1 に示す．各ゾーン間の位相差を与える最小段差 d は

$$d = \frac{\lambda_0}{P(\sqrt{\epsilon_r} - 1)} \quad (5)$$

で与えられ [4]~[8], レンズ全体の厚さ T は

$$T = t + s \quad (6)$$

$$s = d(1 - P) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \left(1 - \frac{1}{P}\right) \quad (7)$$

で与えられる. ここで, t はレンズのベース厚である. 式 (7) は中心軸での位相遅れ Δ が $2\pi(1 - 1/P)$ であることに対応しており, $P \geq 2$ であることから, Δ のとり得る範囲は $\pi \leq \Delta < 2\pi$ である. したがって式 (7) は最も薄いフレネルレンズを得るための条件を表している.

式 (4)~(7) を用いてフレネルレンズの設計を行った. レンズ口径が $D = 100 \text{ mm}$ のときに焦点距離が $F = 152.2 \text{ mm}$ となるようフルウェーブゾーン数を $N = 2$ とした. 設計周波数を 75 GHz ($\lambda_0 = 4 \text{ mm}$) とし, レンズの材質として比誘電率が $\epsilon_r = 2.34$ の高密度ポリエチレンを用いた. 比較として用いる非球面レンズも同様に, 高密度ポリエチレンを使用し, レンズ口径 $D = 100 \text{ mm}$, 焦点距離 $F = 134 \text{ mm}$, 厚さ $T = 20 \text{ mm}$ でその曲面が

$$f(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} \quad (8)$$

で与えられる非球面形状をもつ. ここで, 出射面においては $K = -4.026$, $c = 3.843$, 入射面においては $K = -1.353$, $c = 9.465$ である.

3. 二次元 FDTD 法による設計

3.1 解析モデル

設計したフレネルレンズ及び非球面レンズについて二次元 FDTD 法による解析を行った. なお, フレネルレンズの形状は式 (4)~(7) を用いて 75 GHz において設計しているが, 以下の図 4~図 6 では 76.5 GHz における特性を示している. 解析モデルを図 3 に示す. フレネルレンズの場合は出射面の中心点, 非球面レンズの場合は厚さの中心点を原点に取り, 電界の x 成分 E_x の平面波を光軸に対して垂直に入射させた. 解析において, セルサイズは $\Delta x = \Delta z = 0.1 \text{ mm}$, 吸収境界条件として 4 層の PML を用い, タイムステップ数を 50000, 励振はガウスパルスとした.

3.2 サブゾーン数 P 及びベース厚 t による影響

フレネルレンズのサブゾーン数 P による影響を検討するために, 設計したベース厚 t の異なるフレネルレンズについて, P を 2~75 まで変化させて解析を

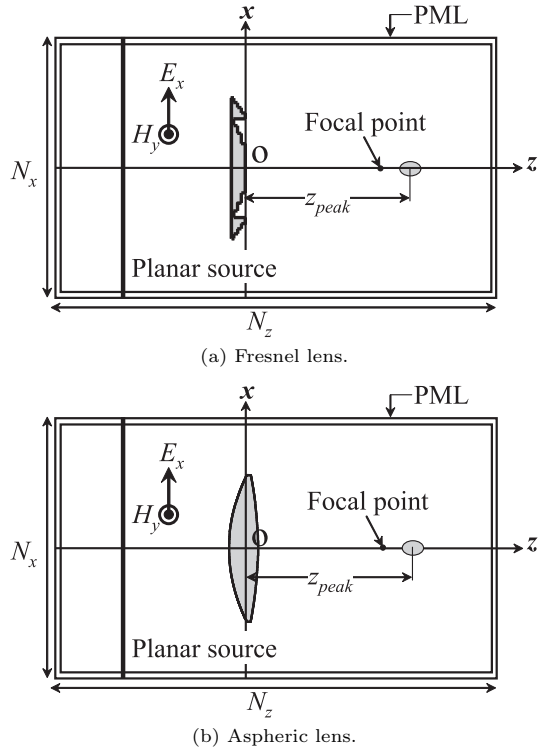


図 3 解析モデル (平面波入射, $N_x = 2001$, $N_z = 4501$)
Fig. 3 Model for analysis (Plane wave incidence, $N_x = 2001$, $N_z = 4501$).

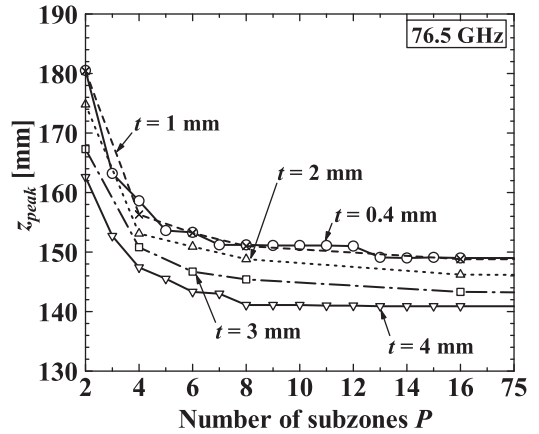


図 4 サブゾーン数 P に対する集光位置 $z = z_{peak}$
Fig. 4 Focusing point $z = z_{peak}$ versus number of subzones P .

行った.

P に対するそれぞれのレンズの集光位置 $z = z_{peak}$ を図 4 に示す. $t = 0.4 \text{ mm}$ と $t = 1 \text{ mm}$ のレンズは P が大きくなるほど設計焦点距離 $F = 152.2 \text{ mm}$ 付

近に収束したが、ベース厚の厚いレンズは F よりも短い距離に収束した。

それぞれのレンズの集光位置 $z = z_{peak}$ における振幅を図5に示す。ただし、振幅は周波数 76.5 GHz における値を示しており、 $t = 0.4$ mm, $P = 2$ の場合の値で規格化している。 P が大きくなるにつれて一定の振幅に収束しており、 $t = 2$ mm 及び $t = 3$ mm の場合の収束値は $t = 0.4$ mm, $P = 2$ の場合に比べて 4 dB 程度大きい振幅に収束した。ただし、 $t = 4$ mm の場合においても $P = 6$ のときのみ 4 dB 程度の振幅が得られた。

光軸上の振幅分布から焦点深度 W_z を 3 dB 幅で定義したときの、 P に対する W_z を図6に示す。いずれ

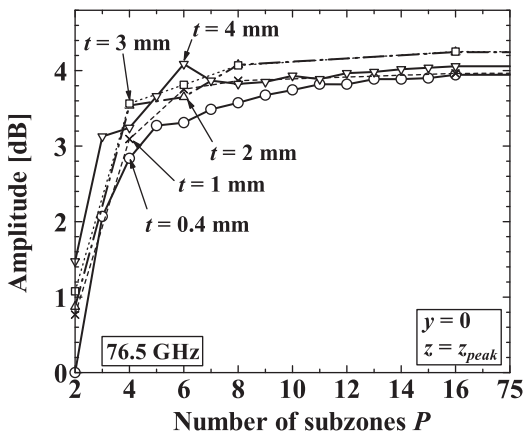


図5 サブゾーン数 P に対する集光位置 $z = z_{peak}$ における振幅

Fig.5 Amplitude at focusing point $z = z_{peak}$ versus number of subzones P .

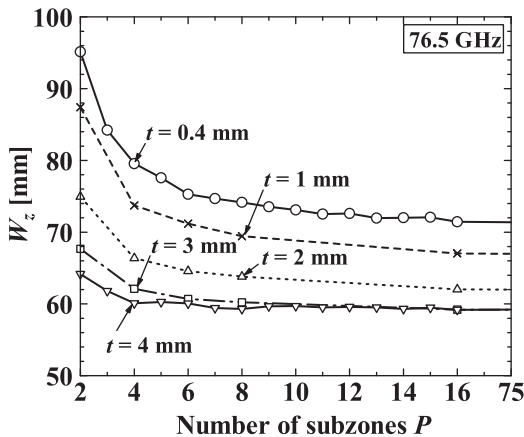


図6 サブゾーン数 P に対する焦点深度 W_z

Fig.6 Depth of focus W_z versus number of subzones P .

の P においてもベース厚 t が大きいほど W_z が小さくなり、 P に対する W_z の収束が早くなる結果が得られた。また、いずれのベース厚においても P が小さい場合は W_z が収束値に比べて大きくなる結果が得られた。

以上の結果から、 P が大きいほど集光特性が良くなることが確認できた。 P は最小段差 d を決めるパラメータであることから、 P を増加させることで位相補正が精密化され集光特性が改善されたものと考えられる。

一方、製造工程の簡易化を図るためには P をできるだけ小さく設計する必要がある、ベース厚 t は機械的強度を確保するために大きくする必要がある。解析結果より、 $t = 4$ mm, $P = 6$ で機械的強度を確保しつつ十分な振幅が得られることが分かった。

3.3 周波数特性

ベース厚 t 及びサブゾーン数 P の異なるフレネルレンズの周波数 70~80 GHz における周波数特性を評価した。比較として同一レンズ口径である $D = 100$ mm の非球面レンズの計算結果も載せている。

集光位置 $z = z_{peak}$ の周波数特性を図7に示す。式(4)において $n = NP$ とすると次式が得られる。

$$F = \frac{1}{2N\lambda} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - (N\lambda)^2 \right] \quad (9)$$

図7には式(9)による焦点距離の理論値も載せている。非球面レンズの場合は z_{peak} が焦点距離 $F = 134$ mm 付近ではほぼ一定であるのに対し、フレネルレンズの場

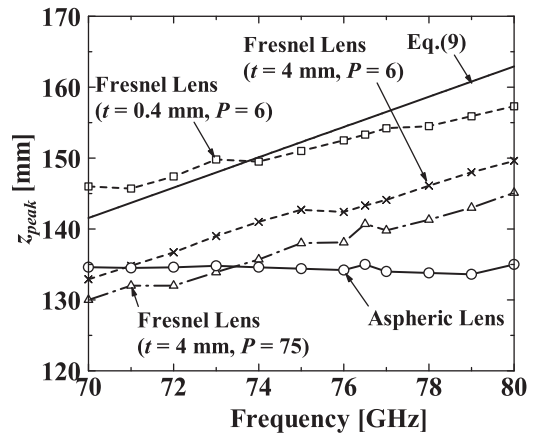


図7 集光位置 $z = z_{peak}$ の周波数特性

Fig.7 Frequency characteristic of focusing point $z = z_{peak}$.

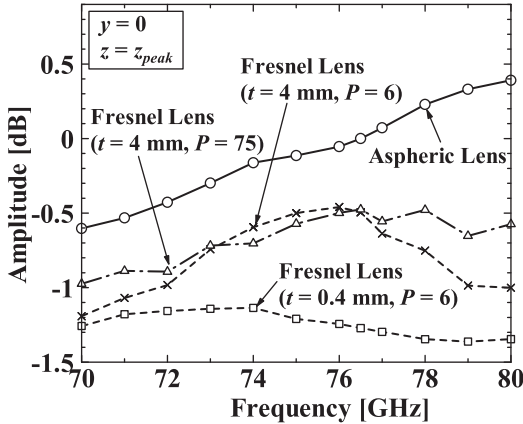


図 8 集光位置 $z = z_{peak}$ における振幅の周波数特性
Fig. 8 Frequency characteristic of amplitude at focusing point $z = z_{peak}$.

合は周波数が高いほど集光位置 z_{peak} が大きくなる結果が得られた。ベース厚が薄い $t = 0.4$ mm, $P = 6$ のフレネルレンズは理論式におおむね一致した結果が得られているが, $t = 4$ mm, $P = 75$ では理論値より短い距離に集光する結果が得られた。

それぞれレンズの $z = z_{peak}$ における振幅の周波数特性を図 8 に示す。ただし, 振幅は非球面レンズの 76.5 GHz における値で規格化している。非球面レンズは周波数が高くなるほど振幅が上昇したが, これは実効開口面積が大きくなったためである。一方, フレネルレンズは設計周波数付近で利得が大きくなり, 設計周波数を超えるとやや振幅が低下する結果が得られた。この結果から, フレネルレンズは周波数依存性が強く, 設計周波数付近を除いて振幅が低下するが, 高周波数では実効開口面積が大きいため振幅の低下が小さくなることが分かった。また, 76.5 GHz における $t = 4$ mm, $P = 6$ のフレネルレンズの振幅は非球面レンズに対して 0.5 dB の低下であることが分かった。

焦点深度 W_z の周波数特性を図 9 に示す。非球面レンズの場合は周波数が高くなるほど W_z が小さくなったのに対し, フレネルレンズの場合は周波数が高くなるほど W_z が大きくなった。また, フレネルレンズの W_z はベース厚 t に対しては大きく変動したが, P に対してはほとんど変化しない結果が得られた。

4. 実験

4.1 測定系

前章で設計したレンズ口径が 100 mm のフレネルレ

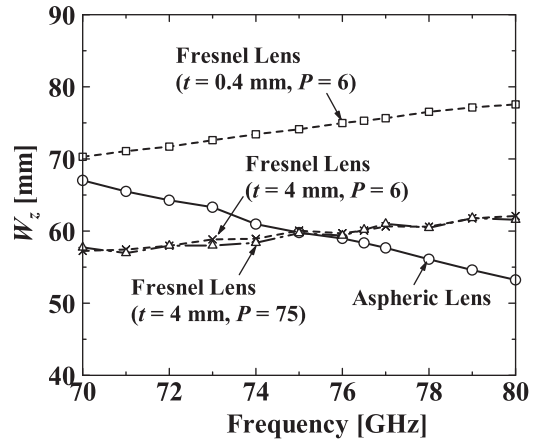


図 9 焦点深度 W_z の周波数特性
Fig. 9 Frequency characteristic of depth of focus W_z .

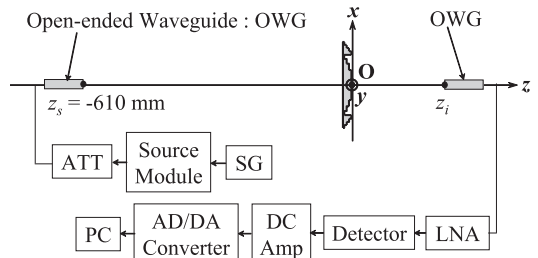


図 10 測定系
Fig. 10 Measurement system.

レンズを $P = 4, 6$ の場合について試作し, 基本特性の評価を行った。なお, レンズ全体の厚さが $T = 10$ mm となるように, ベース厚 t は $P = 4$ の場合 $t = 4.34$ mm, $P = 6$ の場合 $t = 3.71$ mm として製作した。測定系を図 10 に示す。信号発生器から 12 GHz 帯の信号を出力し, ミリ波ソースモジュールで 60~90 GHz に周波数を変換し, 減衰器を介して送信アンテナから送信する。また, 受信アンテナで受信したミリ波は低雑音増幅器で増幅し, ショットキーバリアダイオード (Schottky barrier diode, SBD) で二乗検波された検波電圧を DC 増幅器で増幅後, A-D 変換器でデジタル信号に変換してパソコンで計測する構成である。送受信アンテナには開口端導波管アンテナ (Open-ended Waveguide, OWG) を用いた。レンズ表面から距離 $z_s = -610$ mm の位置に送信アンテナの先端を配置し, 受信アンテナの位置を変化させて受信電圧を測定した。

FDTD 解析では有限距離からの入射を考慮するた

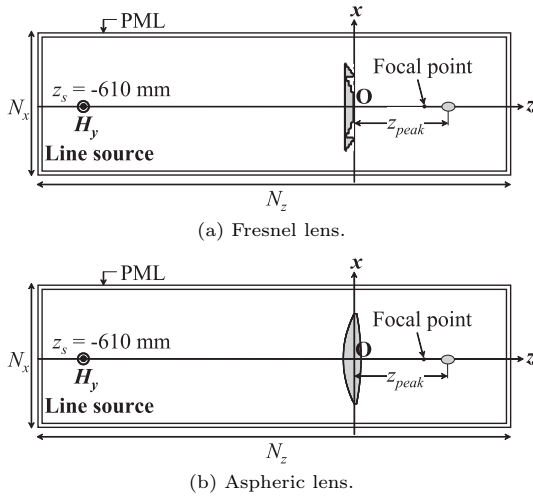


図 11 解析モデル (線波源, $N_x = 2001$, $N_z = 11001$)
 Fig. 11 Model for analysis (Line source, $N_x = 2001$, $N_z = 11001$).

めに図 11 に示す線波源を用いた。3.1 と同様の解析条件のもとで、距離 $z_s = -610$ mm の位置で線波源を励振し、タイムステップ数を 120000 とした。

4.2 光軸上の電界強度分布

光軸上の電界強度分布の計算値と測定値をそれぞれ図 12(a), (b) に示す。ただし、振幅は 76.5 GHz における値を示しており、 $P = 6$ のフレネルレンズの最大受信電圧で規格化している。測定における z 方向の走査間隔は 4 mm とした。集光位置 z_{peak} における振幅は、実験では $P = 6$ のフレネルレンズに対して $P = 4$ では 0.5 dB 低下し、非球面レンズは 1.5 dB 上昇した。一方、FDTD 計算結果は $P = 6$ のフレネルレンズに対して $P = 4$ では 0.8 dB 低下し、非球面レンズは 0.8 dB 上昇した。以上のように、実験、FDTD 解析ともに受信電界強度は $P = 6$ の方が $P = 4$ よりも大きくなった。集光位置 z_{peak} の測定値と計算値を表 2 に示す。 z_{peak} の測定値は計算値とおおむね一致する結果が得られた。

4.3 開口分布及び回折パターン

非球面レンズと $P = 6$ のフレネルレンズの開口面上の振幅分布の測定結果をそれぞれ図 13(a), 図 13(b) に示す。どちらもレンズの表面から z 方向に 4 mm 離れた xy 面において受信アンテナを走査間隔 1 mm で走査して受信電圧分布を測定し、それぞれの最大受信電圧で規格化している。非球面レンズの場合、レンズ口径 100 mm の全体にわたりほぼ一様な開口分布が

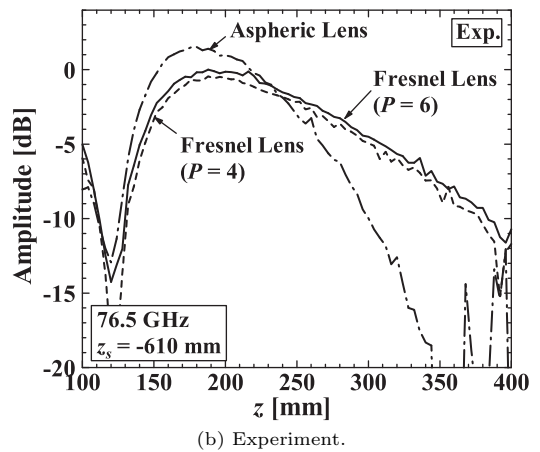
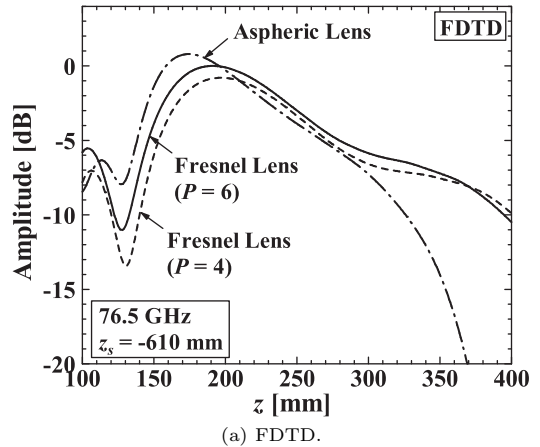


図 12 光軸上の電界強度分布
 Fig. 12 Electric field intensity on optical axis.

表 2 集光位置 $z = z_{peak}$ の計算値と測定値の比較
 Table 2 Comparison of focusing point $z = z_{peak}$ between calculated values and measured values.

Lens	Focusing point $z = z_{peak}$ [mm]	
	Experiment	FDTD
Fresnel lens ($P = 6$)	188	192.1
Fresnel lens ($P = 4$)	188	196.7
Aspheric lens	176	174.0

Scanning pitch of receiving OWG along optical axis: 4 mm

得られた。フレネルレンズの場合についてもおおむね一様な分布が得られているが、ゾーニングの境界において同心円状のわずかな振幅の低下が見られ、フルウェーブゾーンの境界にあたる半径 $r = 35$ mm 付近で振幅が 2 dB 程度低下した。

レンズの像面における回折パターンを評価する際の基準として、開口が円形で分布を一様とした回折パ

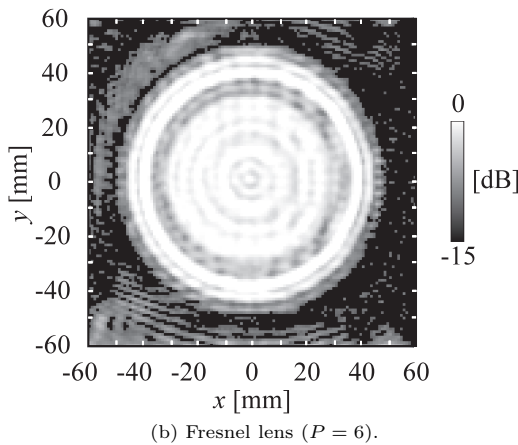
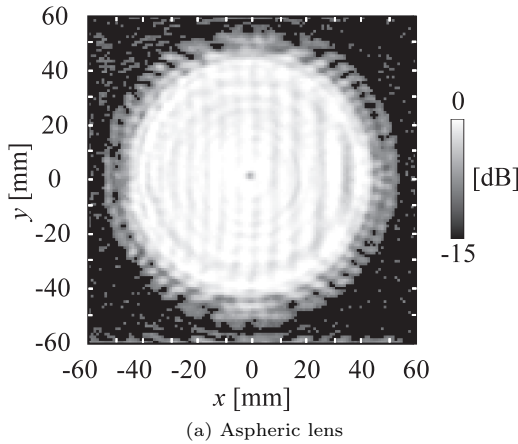


図 13 レンズ表面から 4 mm の位置における開口面上の振幅分布 (実験)

Fig. 13 Aperture distribution of magnitude with distance of 4 mm from lens surface (Experiment).

ターンすなわちエアリーパターンが広く用いられている。そこで、本論文でも比較のためにエアリーパターンを用いた。一様分布を有する円形開口から十分離れた距離 $L (\gg D^2/\lambda)$ における像面での電力密度の回折パターンは

$$P(x) = K \left[\frac{J_1(R)}{R} \right]^2, \quad R = \frac{\pi D x}{\lambda L} \quad (10)$$

で与えられる。ここで K は定数である。

非球面レンズと $P = 6$ のフレネルレンズそれぞれの集光位置 $z = z_{peak}$ における回折パターンの測定結果及び式 (10) による値を図 14 に示す。ただし、これらのパターンは最大値で規格化してある。図には 3dB 幅で定義したメインローブのビーム幅 W_x も示してあ

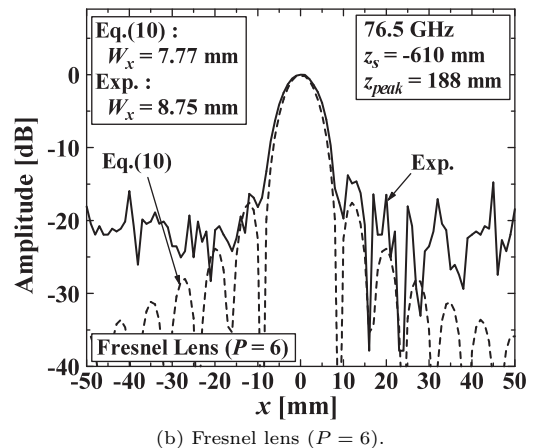
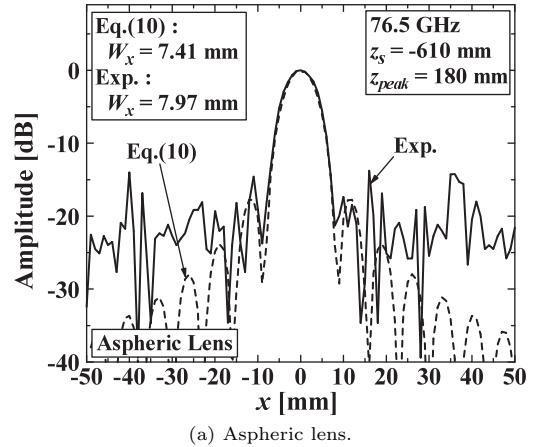


図 14 回折パターン (実験)

Fig. 14 Diffraction pattern (Experiment).

る。非球面レンズのビーム幅は式 (10) による値とほぼ一致する結果が得られたが、フレネルレンズの場合は測定値が 1 mm 程度大きい。これは、図 13 (b) に示すように開口分布が部分的に不均一であったため、一様分布を仮定した式 (10) のビーム幅よりわずかに広がったものと考えられる。サイドローブレベルについては、いずれのレンズも第 1 サイドローブまでは式 (10) に比べてわずかに増加しているもののおおむね一致している。式 (10) に対するサイドローブレベルの増加もメインローブ同様開口分布の不均一性によるものと考えられる。一方、第 2 サイドローブ以降の測定値は $-15 \sim -20$ dB 程度であり式 (10) の値と比べてかなり大きい。この原因として、レンズ端部からの回折波の影響が考えられ、二次元 FDTD 解析により確認している。図 12 (a) の集光位置 z_{peak} における回折

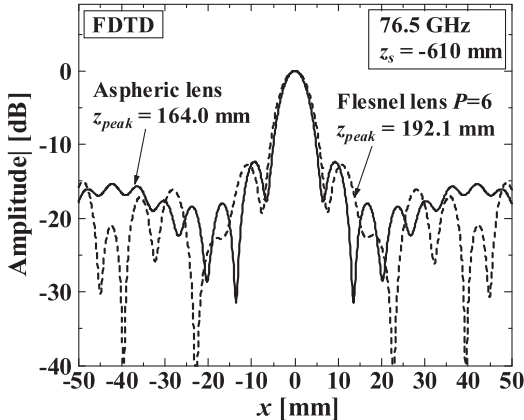


図 15 回折パターン (FDTD)
Fig.15 Diffraction pattern (FDTD).

パターンを FDTD 解析により求めた結果を図 15 に示す。非球面レンズ及びフレネルレンズのいずれの場合も第 2 サイドローブ以降の広角にわたり -15 dB 程度まで増加していることが分かる。

5. む す び

二次元 FDTD 法を用いてミリ波帯フレネルレンズのサブゾーン数、ベース厚などの構造パラメータを変化したときの集光位置における電界振幅、焦点深度等の基本特性を求めた。その結果、ベース厚が $t = 4$ mm、サブゾーン数が $P = 6$ の構造において機械的強度を確保しつつ大きい振幅が得られた。更に、設計したフレネルレンズを試作して測定を行った結果、集光位置における電界振幅は非球面レンズに比べ約 1.5 dB の低下であることが明らかとなった。また、実験により得られた集光位置、集光位置における電界振幅の特性は解析結果と同様の傾向を示しており、レンズ設計において二次元 FDTD 解析が有用であることが確認された。

謝辞 本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」の助成を得て行われた。

文 献

- [1] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, “ミリ波パッシブイメージング技術 (セキュリティ分野への応用に主に),” 計測と制御, vol.42, no.1, pp.748–753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村 順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田 淳, “77 GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発,” 2009 信学総大, CS-4-1, March 2009.
- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村 順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田 淳, “77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置,” 2010 信学総大, B-1-150, March 2010.
- [4] D.R. Reid and G.S. Smith, “A full electromagnetic analysis of grooved-dielectric Fresnel zone plate antennas for microwave and millimeter-wave applications,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.55, no.8, pp.2138–2146, Aug. 2007.
- [5] D.R. Reid and G.S. Smith, “A comparison of the focusing properties of a Fresnel zone plate with a doubly-hyperbolic lens for application in a free-space, focused-beam measurement system,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.57, no.2, pp.499–507, Feb. 2009.
- [6] D.N. Black and J.C. Wiltse, “Millimeter-wave characteristics of phase-correcting Fresnel zone plates,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-35, no.12, pp.1122–1129, Dec. 1987.
- [7] A. Petosa, N. Gagnon, and A. Ittipiboon, “Effects of Fresnel lens thickness on aperture efficiency,” Proc. 10th Int. Symp. Antenna Techniques and applications EM and URSI Conf., pp.175–178, July 2004.
- [8] H.D. Hristov and H.A.J. Herben, “Millimeter-wave Fresnel-zone plate lens and antenna,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.43, no.12, pp.2779–2785, Dec. 1995.
- [9] 虫明康人, 安達三郎, 基礎電波工学, 共立出版, 1970.
- [10] 滝本未来, 中田 淳, 山田康太, 佐藤弘康, 澤谷邦男, “77 GHz 帯近距離パッシブイメージング用小型レンズアンテナの特性,” 信学技報, A-P2010-46, 2010.
(平成 23 年 1 月 6 日受付, 4 月 22 日再受付)



滝本 未来 (学生員)

平 21 東北大・工・電気情報・物理工学卒。平 23 同大学院修士課程了。主としてミリ波パッシブイメージングに関する研究に従事。



中田 淳 (正員)

平 13 日大・工・電気卒。平 18 東北大学院修士課程了。平 20 中央電子(株)入社。現在東北大研究員, ミリ波イメージングの研究開発に従事。



佐藤 弘康 (正員)

平 5 中央大・理工卒。平 10 東北大学院博士課程了。現在、同大学院工学研究科電気・通信工学専攻助教。電磁界解析手法、プラズマ中のアンテナ、プラズマ生成用アンテナ、広帯域アンテナ、ミリ波イメージングの研究に従事。工博。平 14 トーキン科学技術振興財団研究奨励賞受賞。



澤谷 邦男 (正員)

昭 46 東北大・工・通信卒。昭 51 同大学院博士課程了。現在、同大学院工学研究科電気・通信工学専攻教授。プラズマ中のアンテナ、移動通信用アンテナ、電磁波の散乱・回折、アレーアンテナ、プラズマ加熱用アンテナ、超伝導アンテナの研究に従事。工博。昭 56 本会学術奨励賞、昭 63 同論文賞受賞。